

УДК 621.385.632

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК, к. т. н. Я. Н. СТРОКОВСКИЙ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМПЛЕКСНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕДУКЦИИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ АМПЛИТУДОЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА В ЛБВ

Получены формулы для расчета вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента редукции для цилиндрического потока электронов с экспоненциально изменяющейся амплитудой переменной составляющей тока в лампе бегущей волны (ЛБВ). Показано, что учет мнимой части коэффициента редукции для линейного режима работы ЛБВ может изменить расчетную величину объемного заряда в 1,5–2 раза, что в свою очередь достаточно сильно влияет на формирование начальных условий нелинейного режима, а затем и на выходные характеристики ЛБВ.

Ключевые слова: комплексный коэффициент редукции, цилиндрический поток электронов, переменная составляющая тока, объемный заряд, ЛБВ.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) с замедляющими системами на спирали или на связанных резонаторах являются электровакуумными приборами, усиливающими СВЧ-сигнал в диапазоне от 1 до 100 ГГц. По комплексу своих параметров и характеристик ЛБВ не имеет себе равных среди других электровакуумных СВЧ-приборов — клистронов и магнетронов. Именно сочетание таких параметров, как высокое усиление СВЧ-сигнала (до 60 дБ), высокая средняя мощность (от десятков до сотен ватт и даже кВт для ЛБВ на связанных резонаторах) и одновременно с этим — широчайшая полоса частот (до одной-двух октав) и обуславливает широкую область применения ЛБВ в качестве выходных усилителей для спутников связи, для радиолокационных станций гражданского и военного профиля, а также в электронных системах радиопротиводействия.

Усиление СВЧ-сигнала в ЛБВ происходит в результате длительного взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной, распространяющейся вдоль замедляющей системы прибора. Единственным недостатком ЛБВ, который обусловлен длительным характером такого взаимодействия, является сравнительно невысокий электронный КПД, обычно не превышающий 15–20 % в спиральных ЛБВ. Способ одновременного повышения КПД и устойчивости ЛБВ к самовозбуждению на обратной гармонике был предложен еще в 1970 г. [1]: в замедляющую систему ЛБВ, начиная примерно с середины выходной секции лампы, вводится неоднородность в виде скачкообразного уменьшения шага замедляющей системы. Развитию этого направления в 1970–80 гг. было посвящено большое число работ — как теоретических, так и экспериментальных.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что КПД ЛБВ с одним скачком фазовой скорости (**ФС**) повышается не так значительно, как это получается в теоретических расчетах, к тому же несколько падает и коэффициент усиления ЛБВ. Более того, в некоторых случаях в экспериментальных макетах изохронной ЛБВ и ЛБВ со скачком **ФС**, введенным в точку максимума выходной мощности для однородной ЛБВ, рассчитанное повышение КПД вообще не было реализовано из-за невозможности обеспечения устойчивой работы выходной секции ЛБВ [2]. Причины такого несоответствия экспериментальных результатов расчетам в то время не были найдены.

Вместе с тем, в экспериментальных макетах ЛБВ с двойным скачком фазовой скорости КПД взаимодействия был увеличен в 1,5 раза по сравнению с КПД однородной ЛБВ [2]. При этом мы обратили внимание на то, что в таких ЛБВ отличия экспериментальных значений КПД и длины выходного участка спирали от расчетных были значительно меньшими, чем в ЛБВ с одним скачком фазовой скорости для случаев с высоким КПД. По нашему мнению, это связано с тем, что длина двойного скачка **ФС** составляет не более 10% длины выходной секции ЛБВ, в то время как протяженность участка спирали с одним скачком **ФС** намного больше (в 3–4 раза). Следовательно, точность исходных значений безразмерных параметров ЛБВ обязательно скажется на расчетных характеристиках ЛБВ, особенно в случае с одним скачком фазовой скорости, когда расчет происходит на большей длине взаимодействия.

Известно, что от величины параметра объемного заряда $4QC$ сильно зависят выходные характеристики ЛБВ — усиление и КПД [3, 4]. Для

вычисления параметра $4QC$ необходимо знать коэффициент депрессии p^2 , значению которого он прямо пропорционален. Для однородных спиральных ЛБВ значения коэффициента депрессии (или редукции) были определены еще в 1950-х — в начале 1960-х годов [3, 5]. С тех пор они неизменно применялись для вычисления параметра объемного заряда и позволяли рассчитывать выходные характеристики ЛБВ. Отличие расчетных и экспериментальных значений КПД, усиления и длины участков однородных спиральных ЛБВ были несущественными и определялись допущениями, принятыми при выводе основных уравнений ЛБВ. Поэтому при расчетах объемного заряда для ЛБВ со скачками фазовой скорости традиционно использовали те же значения коэффициентов депрессии, полученные с учетом только его действительной части. Вместе с тем, нетрудно заметить, что если в выражениях для определения коэффициента редукции [3, 6] переменная составляющая возбуждающего тока изменяется по амплитуде, то коэффициент редукции является комплексной величиной. Вероятно, неучет этого факта может существенно влиять на расчетное значение объемного заряда, а значит и на параметр несинхронности при тех его значениях, которые характерны для ЛБВ со скачком фазовой скорости.

Целью настоящей работы является вывод уравнений для вычисления комплексного коэффициента редукции и анализ влияния его мнимой части на точность вычисления параметра объемного заряда в спиральной ЛБВ.

Расчет комплексных коэффициентов редукции

Будем искать действительную (p_1) и мнимую (p_2) части комплексного коэффициента редукции для аксиально-симметричного потока электронов с переменной составляющей плотности тока (в дальнейшем — тока), изменяющейся по амплитуде:

$$i \sim \exp[j(-\beta_0 + j \cdot \Delta\beta)z], \quad (1)$$

где j — мнимая единица;

β_0 — постоянная распространения;

$\Delta\beta$ — амплитудная постоянная;

z — продольная координата.

Для этого воспользуемся выражением для коэффициента редукции (см. формулу (7) в [6]), положив $n=0$. Поперечную постоянную распространения с учетом (1) и условия $|\Delta\beta| \ll \beta_0$ (что обычно соблюдается на практике) запишем как

$$\gamma = [(\beta_0 - j \cdot \Delta\beta)^2 - (kR)^2]^{0.5} = (\beta_0^2 - k^2)^{0.5} + j \cdot \Delta\beta = \gamma_0 + j \cdot \Delta\beta. \quad (2)$$

Подставив это выражение в формулу (7) из [6], разложив в ряд по малому параметру $\Delta\beta$ и отделив вещественную и мнимую части в выражении для коэффициента редукции, получаем

$$p^2 = p_1 + j p_2 r_n \cdot \Delta\beta, \quad (3)$$

где

$$p_1 = 0,5v^2[I_0(v)K_0(v) + I_1(v)K_1(v) - A_1(\alpha v)A_0(v)] - 0,5I_1^2(v)/A_0(v); \quad (4)$$

$$p_2 = v\gamma_0 \Delta\beta[I_0(v)K_0(v) - A_1(\alpha v)I_0^2(v) - I_0(v)I_1(v)[vA_0(v) - I_0(v)I_1(v)]/[v^2A_0^2(v)] + 0,5A_0(v)/I_0^2(\alpha v)]. \quad (5)$$

При этом

$$A_0(v) = I_0^2(v) - I_1^2(v);$$

$$A_1(\alpha v) = K_0(\alpha v)/I_0(\alpha v);$$

$$v = \gamma_0 r_n; \quad \alpha = \gamma_0 R/v;$$

$$\gamma_0 = (\beta_0^2 - k^2)^{0.5};$$

$$k = \omega(\epsilon_0 \mu_0)^{0.5};$$

$I_0(v)$, $I_1^2(v)$, $K_0(\alpha v)$, $K_0(\alpha v)$ — модифицированные функции Бесселя порядка 0 и 1.

В этих формулах приняты следующие обозначения:

r_n — радиус потока (пучка) электронов;

R — радиус цилиндрического волновода с идеальной проводимостью стенок;

ϵ_0 , μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума соответственно;

ω — круговая частота.

Функция распределения тока по радиусу совпадает здесь с распределением поля синхронной волны.

На рис. 1, а, б штриховыми линиями приведены рассчитанные по формулам (4) и (5) значения вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента редукции для разных значений заполнения пролетного канала электронным пучком r_n/R . Сплошными линиями показаны коэффициенты редукции при равномерном распределении тока по радиусу пучка (сплошные линии), которые были получены по формулам

$$p_1 = 1 - 2I_1(v)[K_1(v) + A_1(\alpha v)I_1(v)];$$

$$p_2 = 2v(I_1^2(v)/[vI_0^2(\alpha v)] - 2[I_0(v) - I_1(v)/v]A_1(\alpha v)I_1(v) - I_0(v)K_1(v) + I_1(v)[K_0(v) + 2K_1(v)/v]).$$

Следует отметить, что значения вещественной части коэффициента редукции, приведенные на рис. 1, а, примерно совпадают с теми, что обычно используются в расчетах в случае равномерного распределения тока.

На рис. 1, а, б штриховые и сплошные линии совпадают при $\gamma_0 r_n < 0,6$, т. е. в этой области значения вещественной и мнимой частей коэффициента редукции не зависят от характера распределения тока по радиусу. В интервале $0,6 < \gamma_0 r_n < 0,9$ такая зависимость уже наблюдается, однако значения p_1 и p_2 , полученные для разных видов распределения тока по радиусу, отличаются между собой не более чем на 8%.

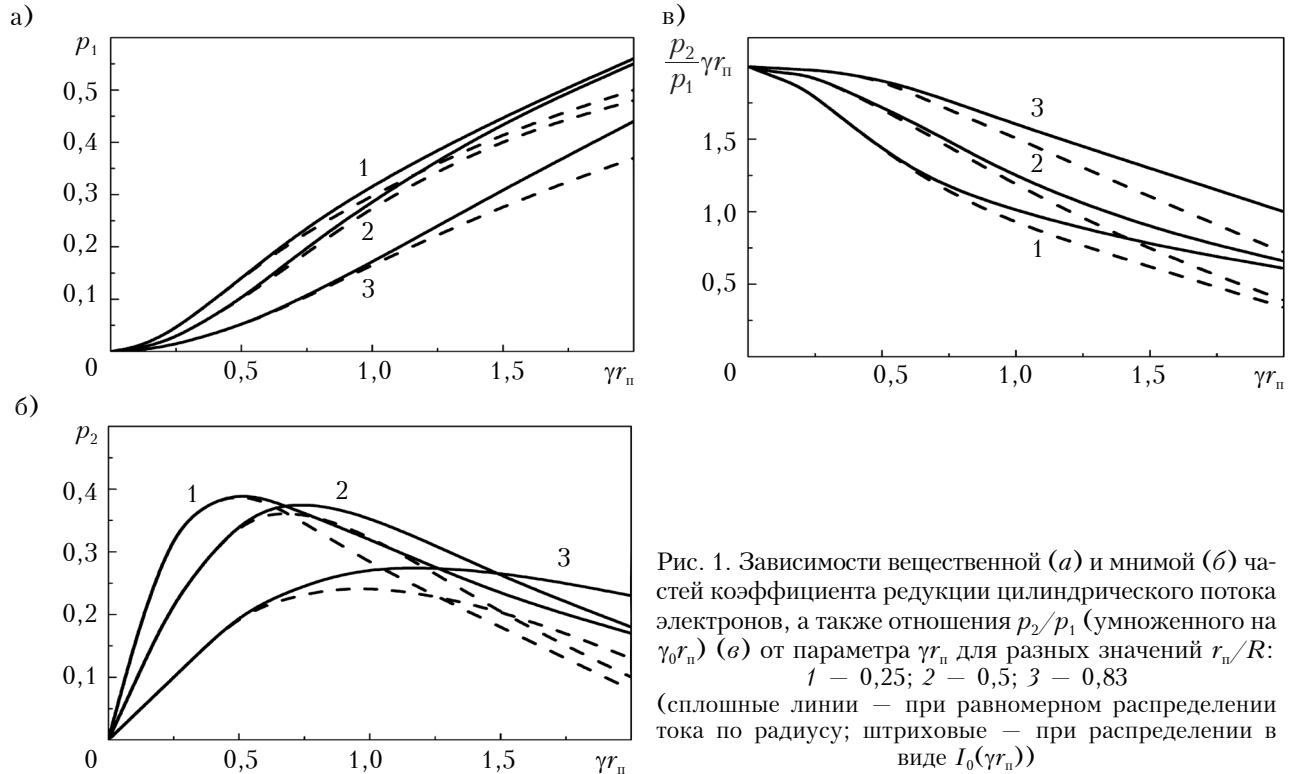


Рис. 1. Зависимости вещественной (а) и мнимой (б) частей коэффициента редукции цилиндрического потока электронов, а также отношения p_2/p_1 (умноженного на $\gamma_0 r_n$) (в) от параметра γr_n для разных значений r_n/R : 1 — 0,25; 2 — 0,5; 3 — 0,83 (сплошные линии — при равномерном распределении тока по радиусу; штриховые — при распределении в виде $I_0(\gamma r_n)$)

Из рис. 1, в видно, что в области значений $\gamma_0 r_n < 0,9$ (типичных для спиральных ЛБВ) величина отношения $p_2/p_1 \cdot \gamma_0 r_n$ находится в пределах 1,3–2,0 для случаев, когда параметр заполнения пучком пролетного канала r_n/R составляет более 0,5, что характерно для выходного участка ЛБВ в динамическом режиме работы. Следовательно, поправка, обусловленная мнимой частью коэффициента редукции, довольно значительна и ее необходимо учитывать при расчетах параметров и характеристик ЛБВ.

Влияние комплексных коэффициентов редукции на параметры ЛБВ, работающей в линейном режиме

Для оценки этого влияния выразим, используя (1), значение $\Delta\beta_0 r_n$ через возбуждающий ток и его производную по продольной координате z :

$$j r_n i \cdot \Delta\beta = -\gamma_0 r_n i - j r_n di/dz. \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (3) и используя записанный таким образом коэффициент редукции для определения поля пространственного заряда, а также следуя методике составления линейных уравнений ЛБВ [3], получаем

$$I_1'' + 4(QC)_3 I_1 = j(1+bC)^2 F, \quad (7) \\ F' + j b_3 F = I_1;$$

где F' , I_1'' — первая и вторая производные, соответственно, безразмерных амплитуд поля и первой гармоники тока по безразмерной длине замедляющей системы;

$$4(QC)_3 = 4QC[1 - K_2 C / (1 + bC)];$$

b — параметр несинхронности;

C — параметр усиления;

$$b_3 = b - \delta b;$$

$$\delta b = 4QC \cdot K_2 C / [2(1 + bC)];$$

$$K_2 = \gamma_0 r_n p_2 / p_1.$$

Из анализа выражения (7) видно, что на участках замедляющей системы ЛБВ до насыщения выходной мощности при $C=0,1$ и $b=\pm(2-4)$ (что характерно для приборов со скачком фазовой скорости в замедляющей системе) поправки могут увеличивать эквивалентный параметр объемного заряда $4(QC)_3$ приблизительно в два раза при $b=-(2-4)$ или уменьшать его, тоже приблизительно в два раза при $b=2-4$. Кроме того, эквивалентный параметр несинхронности b_3 зависит от параметра объемного заряда и отношения $p_2/p_1 \cdot \gamma_0 r_n$ (см. рис. 1, в).

Отметим, что при нелинейном режиме работы ЛБВ изменение амплитуды переменной составляющей тока не является экспоненциальным и мало меняется вдоль продольной оси прибора, т. е. в этом случае комплексные поправки можно было бы и не учитывать. Однако на линейном участке взаимодействия влияние поправок существенно, а значит, они оказывают сильное влияние на начальные условия нелинейного режима и, соответственно, на выходные характеристики ЛБВ.

Полученные здесь комплексные коэффициенты редукции могут быть применены в нелинейных уравнениях ЛБВ для первого приближения.

Для этого случая p_2 удобно представить в форме

$$p_2 = p_1 [1 + jK_2 C / [2(1 + bC)] \cdot (I_1 I_1^*)' / (I_1 I_1^*)], \quad (8)$$

где I_1, I_1^* — безразмерная амплитуда первой гармоники тока и сопряженная ей величина гармоники тока;

$(I_1 I_1^*)'$ — производная по безразмерной длине замедляющей системы.

Подставив выражение (8) в формулу для поля пространственного заряда (IV.24) из [3], можно увидеть, что мнимая часть (8) дает поправку к полю пространственного заряда, которая легко может быть учтена в системе нелинейных уравнений ЛБВ.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что для более точного расчета параметра объемного заряда в ЛБВ со спиральной замедляющей системой в случае цилиндрического потока электронов с экспоненциально изменяющейся амплитудой переменной составляющей плотности тока следует учитывать мнимую часть коэффициента редукции. В линейном режиме работы ЛБВ при величине параметра усиления $S=0,1$ и параметра несинхронно-

сти $b=\pm(2-4)$ в области значений $\gamma_0 r_n < 0,9$ такая поправка приводит к изменению вычисленного без нее объемного заряда в 1,5 — 2 раза. Это, в свою очередь, оказывает существенное влияние на формирование начальных условий нелинейного режима и, соответственно, на расчетные характеристики ЛБВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. USA 3.614.517. Traveling wave electron interaction device having efficiency enhancement means / Norman J Dionne. — 30.04.1970.
2. Маливанчук В. И., Рукин В. П. Исследование ЛБВ с двумя скачками фазовой скорости // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1974. — Вып. 11. — С. 51–56.
3. Цейтлин М. Б., Кац А. М. Лампа с бегущей волной. — Москва: Советское радио, 1964.
4. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 2. — Москва: Высшая школа, 1972.
5. Branch G. M., Mihan T. G. Plasma frequency Reduction factors in electron beam // IRE Trans. Electr. Dev. — 1955. — Vol. ED-2. — P. 3–11.
6. Строковский Я. Н., Часнык В. И. Вычисление коэффициентов депрессии для цилиндрического потока электронов с вариацией переменной составляющей плотности тока по азимуту // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1980. — Вып. 4. — С. 94–97.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.09 2013 г.

В. И. ЧАСНИК, Я. М. СТРОКОВСКИЙ

Україна, м. Київ, НДІ «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМПЛЕКСНИЙ КОЕФІЦІЄНТ РЕДУКЦІЇ ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОНІВ ЗІ ЗМІНЮВАНОЮ АМПЛІТУДОЮ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ В ЛБХ

Отримано формули для обчислення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта редукції для циліндричного потоку електронів з експоненціально змінюваною амплітудою змінної складової струму в лампі біжучої хвилі (ЛБХ). Показано, що врахування уявної частини коефіцієнта редукції для лінійного режиму роботи ЛБХ може змінювати розрахункову величину об'ємного заряду у 1,5–2 рази, що в свою чергу достатньо сильно впливає на формування початкових умов нелінійного режиму, а згодом і на вихідні характеристики ЛБХ.

Ключові слова: комплексний коефіцієнт редукції, циліндричний потік електронів, змінна складова струму, об'ємний заряд, ЛБХ.

V. I. CHASNYK, YA. N. STROCOVSKY

Ukraine, Kiev, SRI «Orion»
E-mail: ndiorion@tsua.net

COMPLEX REDUCTION COEFFICIENT FOR A CYLINDRICAL ELECTRON BEAM WITH VARIABLE AMPLITUDE OF THE VARIABLE CURRENT COMPONENT IN THE TWT

The conventional approach to calculating the space charge for the traveling-wave tube (TWT) with phase velocity jumps is to use the same values of the depression coefficient as the ones for homogeneous helical TWTs. However, if the variable component of the exciting current in the expressions for determining the reduction coefficient is changed in amplitude, then the reduction factor is a complex value. Perhaps the neglect of

this fact can significantly affect the volume discharge calculated value, and hence the non-synchronization parameter, for those of its values, which are characteristic of the TWT with a phase velocity jump. In this paper, formulas have been obtained for computation of real and imaginary parts of the complex reduction coefficient for a cylindrical electron beam with exponential variable amplitude of variable current component in the TWT. Influence of complex reduction coefficient on the parameters of the TWT operating in the linear mode is estimated. It is shown that taking into account the imaginary part of the reduction coefficient for linear operation of the TWT makes it possible to change the estimated amount of space charge 1.5 to 2 times, which in its turn has quite a strong effect on the formation of the initial conditions of the nonlinear mode and, subsequently, on the output characteristics of the TWT.

Keywords: complex reduction coefficient, cylindrical electron beam, variable current component, space charge, TWT.

REFERENCES

1. N. J. Dionne. *Traveling wave electron interaction device having efficiency enhancement means*. Patent USA no 3.614.517, 1970.
2. Malivanchuk V. I., Rukin V. P. [Research TWT with two jumps of the phase velocity]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1974, iss. 11, pp. 51–56 (in Russian).
3. Tseitlin M. B., Kats A. M. *Lampa s begushchei volnoi* [Tube with a traveling wave]. Moscow, Sovetskoe Radio, 1964 (in Russian).
4. Lebedev I. V. *Tekhnika i pribory SVCh*. T. 2 [Microwave equipment and Devices. Vol. 2]. Moscow, Vysshaya shkola, 1972 (in Russian).
5. Branch G. M., Mihran T. G. Plasma frequency reduction factors in electron beams. *Electron Devices, IRE Transactions on*, 1955, vol. 2, iss. 2, pp. 3–11. doi: 10.1109/T-ED.1955.14065
6. Stokovskii Ya. N., Chasnyk V. I. [Calculation of the depression coefficients for a cylindrical electron beam with the azimuth variation of the current density variable component] *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1980, iss. 4, pp. 94–97 (in Russian).

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Гилмор-мл. А. С. Лампы с бегущей волной.— Москва: Техносфера, 2013.

Книга основана на материалах лекций и семинаров по СВЧ-лампам, которые автор многократно представлял в ведущих фирмах и университетах США. В ней сосредоточены базовые знания по теории и технике наиболее востребованного в течение многих, в том числе и последних десятилетий, прибора — лампы с бегущей волной (ЛБВ). Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала. Книга может быть полезна как для подготовки студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники.



НОВЫЕ КНИГИ



Нанотехнологии в электронике. Вып. 2 / Под ред. Ю. А. Чаплыгина.— Москва: Техносфера, 2013.

Настоящее издание — второй выпуск книги, вышедшей несколько лет назад. Каждую из частей книги представляет группа авторов, активно развивающих данное направление в Национальном исследовательском университете «МИЭТ». Коллектив авторов старался осуществить частичную преемственность материала, содержащегося в первом выпуске, однако структура книги существенно изменилась: группировка статей по условным разделам (теоретико-экспериментальные работы, методы исследований, технологии, приборы и устройства) представляется более правильной с точки зрения понимания общего направления работ в МИЭТ. Каждая из работ представляет собой законченный научный труд обзорного или обобщающего характера, либо является частью оригинальных исследований, полученных за последние 3–5 лет.

